

**ANALISIS STABILITAS STRUKTUR BAWAH BANGUNAN LEPAS
PANTAI UNTUK *FLOATING WIND TURBINE* DENGAN SISTEM
*TENSION LEG – SPAR PLATFORM***

NASKAH PUBLIKASI

TEKNIK SIPIL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



AHMAD ARIQ FIHRIS SABILA

NIM. 125060100111078

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2017

STABILITAS STRUKTUR BAWAH BANGUNAN LEPAS PANTAI UNTUK FLOATING WIND TURBINE DENGAN SISTEM TENSION LEG-SPAR PLATFORM

Ahmad Ariq Fihris Sabila, Alwafi Pujiharjo, Indradi Wijatmiko

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono 167 Malang, 65145, Jawa Timur – Indonesia

ABSTRAK

Floating Wind Turbine with Tension Leg – Spar Platform adalah pembangkit listrik tenaga angin yang dibangun terapung di daerah laut dengan platform gabungan *Tension Leg Platform* dan *Spar Bouy*. Diameter pangkal tiang akan relatif lebih kecil dibandingkan *spar* untuk mengurangi gaya akibat gelombang yang bekerja pada *floater*. Bagian terpenting dari *floater* adalah silinder *spar*. Untuk menambahkan stabilitas pada derajat kebebasan *pitch* dan *roll* maka ditambahkan *leg* yang terikat dengan pondasi tiang pada *seabed* menggunakan *tendon* atau *tethers*. Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis stabilitas *floater* pada enam derajat kebebasan pada benda terapung menggunakan metode Frekuensi Domain. Turbin angin yang dipasang memiliki kapasitas produksi sebesar 5MW dengan diameter *rotor* sebesar 126 meter. Material yang digunakan untuk *spar* adalah pelat baja yang dibentuk silinder dengan penutup ditiap ujungnya, sehingga didapatkan *spar* dengan rongga didalamnya untuk mengurangi berat sendiri. Diameter *spar* sebesar 14 meter dengan panjang *spar* 100 meter. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan bantuan *software* Matlab R2010a dan Microsoft Office Excel. Dalam analisisnya menggunakan pendekatan 2 dimensi serta memasukkan beban-beban yang bekerja pada struktur yang diantaranya adalah beban gelombang dan beban angin. Hasil analisis didapatkan beban gelombang memiliki kontribusi paling besar pada sistem struktur. Besar perpindahan rotasi pada derajat kebebasan *pitch* untuk *sea state* 4 adalah sebesar 0.0025° dan untuk *sea state* 8 (ekstrim) sebesar 0.0135° . Sehingga pada *sea state* 4 dan *sea state* 8 berada pada status *operating* karena besaran *pitch* yang kurang dari 0.7° .

Kata kunci: floating offshore wind turbine, tension leg – spar platform, frekuensi domain.

ABSTRACT

Offshore Floating Wind Turbine with Tension Leg – Spar Platform is electricity generation device which is generated by wind energy that float-mounted on deepwater area with combined platform concept, Tension Leg Platform and Spar Bouy. Diameter of tower base is relatively smaller than spar for reduce wave load that working on floater. The importance part of this floater is spar cylinder. To increase stability at pitch and roll degree of freedom some leg are added to spar and connected to pile foundation at seabed using tethers. In this study will be performed stability analysis of floater in six degrees of freedom using the Frequency Domain method. The wind turbine is installed has a production capacity of 5MW with a rotor diameter of 126 meters. The material used for the spar is formed cylindrical steel plate with cover in each end, a spar with a cavity therein for reduce own weight. Spar diameter is 14 meters with a length of 100 meters. The analysis conducted in this study using the Matlab R2010a and Microsoft Office Excel. In its analysis using 2-dimensional approach and enter the loads acting on the structure of which is the wave loads and wind loads. Analysis result shows that the wave loads have most contributed to the structure of the system. Rotational displacement in degrees of freedom pitch for sea state 4 amounted 0.0025° and for sea state 8 (extreme) of 0.0135° . So at sea state 4 and sea state 8 is the operating status because of pitch displacement is less than 0.7° .

Keywords: *floating offshore wind turbine, tension leg – spar platform, frequency domain.*

PENDAHULUAN

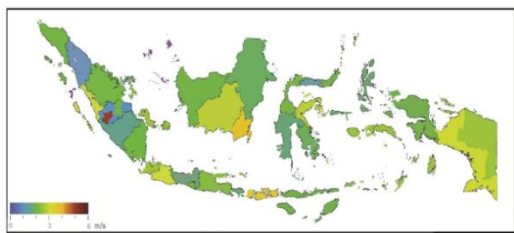
Kondisi perekonomian dunia yang semakin terpuruk menimbulkan permasalahan tersendiri dalam sektor energi. Memasuki abad ke-21 krisis energi mulai menjadi masalah serius dunia maupun di Indonesia. Masalah krisis energi akan semakin parah ketika tidak ada usaha untuk mencari alternatif energi terbarukan.

Batubara, gas, dan minyak masih merupakan sumber daya energi utama di Indonesia. Menurut data yang disajikan dalam *Indonesian Energy Outlook and Statistics* 2014, Konsumsi listrik dalam kurun waktu tahun 2000-2012 mengalami pertumbuhan rata-rata 6,2% per tahun, masih lebih rendah dibanding batubara (9,9%), dan LPG (13,5%). Hal ini menyebabkan rasio elektrifikasi nasional masih 75,8% pada tahun 2012 yang berarti 24,8% penduduk Indonesia belum teraliri listrik. Kondisi ini menunjukkan bahwa tingkat elektrifikasi Indonesia masih rendah jika dibandingkan dengan negara-negara ASEAN lain seperti Singapura 100%, Malaysia 99,4%, Filipina 89,7%, dan Vietnam 97,6%.

Tingginya pangsa pembangkit BBM 88% (39 GW) diimbangi dengan makin meningkatnya pangsa pembangkit berbahan bakar energi terbarukan, seperti panas bumi, dengan pangsa mendekati 3% (1,3 GW), serta pembangkit berbasis hidro dengan pangsa dikisaran 9% (4,2 GW). Disamping itu, pembangkit listrik tenaga matahari dan tenaga angin juga sudah mulai beroperasi dengan kapasitas 6,9 MW.

Pada tahun 2011, Indonesia menempati posisi ke 66 (enam puluh enam) dalam daftar negara-negara yang membangun instalasi pembangkit listrik tenaga angin di dunia, tertinggal jauh apabila dibandingkan dengan Cina pada posisi ke 4 (empat), India pada posisi ke 5 (lima), dan Australia pada posisi ke 14 (empat belas). India dan Australia adalah negara-negara yang berdekatan dengan Indonesia, sehingga memungkinkan apabila Indonesia juga memiliki sumber energi angin yang cukup besar seperti India dan Australia (Hendi, 2011).

Gambar 1 menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Indonesia memiliki kecepatan angin rata-rata antara 2 m/s hingga 3 m/s. Wilayah yang memiliki potensi angin diatas rata-rata adalah Lampung, Jawa Barat, Kalimantan Timur, NTB, dan Papua Barat (Rachman, 2012).



Gambar1 Peta rupa bumi Indonesia berdasarkan kecepatan angin rata-rata (Rachman, 2012)

Namun yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini adalah wilayah yang ditinjau adalah wilayah daratan (bukan lepas pantai). Sehingga potensi angin rata-rata berkisar pada 2 m/s hingga 3 m/s yang mana tidak cukup besar untuk membangkitkan turbin angin skala besar (diatas 1 MW). Salah satu solusi untuk mengembangkan turbin angin skala besar adalah dengan membangun turbin angin di wilayah lepas pantai, sehingga kecepatan angin yang didapat cukup besar dikarenakan wilayah lepas pantai memiliki variabel penghalang lebih sedikit dibandingkan dengan daratan. Pada saat yang sama turbin angin dengan skala yang besar memiliki tingkat kebisingan yang tinggi sehingga kebanyakan pengalaman pelaksanaan turbin angin tidak banyak diinginkan apabila dibangun di daratan.

Keunggulan turbin angin lepas pantai diantaranya adalah kecepatan angin lebih tinggi dikarenakan tidak ada variabel penghalang seperti bukit dan gedung seperti di daratan. Dampak sosial dan lingkungan lebih kecil, ketersediaan area yang sangat luas dan pengalaman industri lepas pantai yang sudah terbukti. Selain itu diharapkan ada pengembangan teknologi yang lebih efisien dalam penerapan struktur bawah turbin angin yang dikenal sangat mahal.

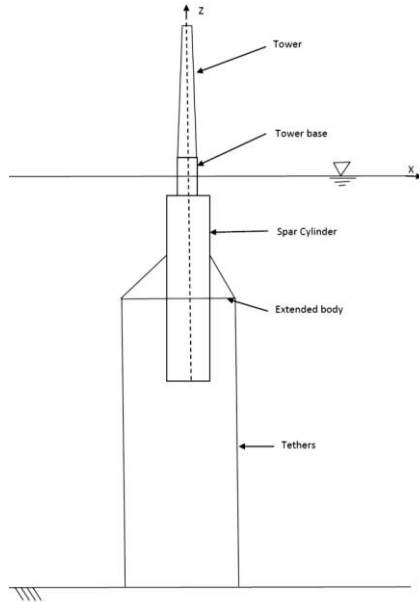
Pada penelitian ini akan dilakukan analisis tentang kontribusi beban yang terjadi pada struktur turbin angin lepas pantai yang diantaranya adalah beban gelombang dan beban angin. Serta dilakukan analisis stabilitas struktur turbin angin lepas pantai pada enam derajat kebebasan yang diantaranya adalah *surge, pitch, heave, pitch, roll, yaw*.

Batasan masalah yang diberikan diantaranya adalah mengabaikan beban aksidental, beban variable fungsional, beban deformasi, beban gempa, *marine growth*, dan beban salju. Analisis yang digunakan adalah pendekatan dua dimensi. Tidak membahas perencanaan pondasi, tendon dan sambungan, serta dimensi baja dan sambungan. Koefisien redaman struktur diabaikan.

TINJAUAN PUSTAKA

Turbin Angin (*Wind Turbine*)

Turbin angin merupakan alat yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik dengan memanfaatkan energi kinetik dari angin. Turbin angin banyak dikembangkan sebagai teknologi energi terbarukan untuk menggantikan sumber energi seperti minyak dan gas. Pada umumnya turbin angin akan ditemui dalam jumlah banyak pada suatu lokasi yang sangat luas atau disebut dengan *wind farm* sepi.



Gambar 2 Layout Konsep Kombinasi Floater dan TLP (Sachithanathamoorthy, 2012)

Konsep *Tension Leg Spar Floater* dapat dilihat pada **gambar 2.9**. Secara umum *floater* terbagi atas dua bagian utama. Bagian atas disebut pangkal menara dan bagian bawah disebut *spar floater*. Menara turbin akan berdiri diatas menara dasar yang memiliki elevasi setinggi 10 meter diatas muka air laut. dan bagian bawah disebut *spar floater*. Menara turbin akan berdiri diatas menara dasar yang memiliki elevasi setinggi 10 meter diatas muka air laut. Pangkal menara akan relatif kecil untuk mengurangi gaya akibat gelombang yang bekerja pada *floater*. Bagian terpenting dari *floater* adalah adalah silinder *spar*. Pemberian *ballast* atau pemberat diperlukan untuk mendapatkan kondisi titik pusat berat benda berada tepat dibawah titik pusat apung yang dapat mengoptimalkan stabilitas *floater*. Jarak tendon terhadap pusat *floater* juga akan mempengaruhi stabilitas *floater*. Untuk mendapatkan stabilitas yang lebih baik diberikan struktur pendukung berupa kaki yang dipasang di badan *spar*.

Stabilitas Struktur Turbin Angin

Besaran *pitch* yang diusulkan oleh Mercier (2004) untuk kondisi stabilitas turbin angin adalah sebagai berikut:

- *Operating* $\leq 0.7^\circ$
- *Survival* $\leq 2.0^\circ$
- *Stand by* $\leq 6.0^\circ$
- *Damaged* $\leq 18.0^\circ$

Beban yang Bekerja pada Struktur

Menurut pada Offshore Standart DNV-OS-J103 tentang “*Design of Floating Wind Turbine Structures*”, pembebanan pada turbin angin terdiri dari lima komponen, yaitu Beban Permanen (G), Beban Variabel Fungsional (Q), Beban Lingkungan (E), Beban *Accidental* (A) dan Beban Deformasi (D). Pada penelitian ini Beban *Accidental* dan Beban Deformasi tidak dibahas.

Beban angin didapatkan dengan menentukan parameter kecepatan angin pada titik yang ditinjau dimana pada penelitian ini menggunakan data angin pada ketinggian 19.5 meter. Dikarenakan kecepatan angin pada tiap elevasi berbeda, maka diperlukan persamaan profil angin:

$$U(z) = U_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha$$

Dimana:

- $U(z)$: Fungsi Profil Kecepatan Angin (m/s)
- U_{hub} : Kecepatan Referensi (m/s)
- z : Ketinggian yang ditinjau (m)
- z_{hub} : Tinggi Referensi (m)
- α : 0.14 (*power law exponent* untuk lokasi lepas pantai)

Untuk menentukan gaya yang diakibatkan angin, persamaan yang diusulkan DNV adalah:

$$F_w = C q S \sin \alpha$$

$$q = \frac{1}{2} \rho_a U_{T,z}^2$$

- α : Sudut antara arah datang angin ($^\circ$)
- S : Luas bidang tekanan angin (m²)
- C : Koefisien bentuk
- F_w : Gaya angin (kg)
- q : Tekanan angin dasar (kg/m²)
- ρ_a : Rapat massa udara (kg/m³)
- U_z : $U(z)$ = kecepatan angin (m/s)

Untuk menentukan gaya hidrodinamik, persamaan yang digunakan adalah persamaan Morison :

$$F_{Surge}(\omega) = \frac{1}{16} \rho_w C_D D_f \omega^2 H_s^2 K_d + \frac{1}{8} \rho_w C_M \pi D_f^2 \omega^2 H_s K_i$$

$$F_{Sway}(\omega) = \frac{1}{16} \rho_w C_L D_f \omega^2 H_s^2 K_l$$

Dimana:

ρ_w	: Rapat Massa Air Laut	(kg/m ³)
C_M	: Koefisien Massa Atau Inersia	
C_D	: Koefisien Hambat	
C_L	: Koefisien Angkat	
D_f	: Diameter Silinder Terapung	
ω	: Frekuensi Angular Gelombang	(rad/s)
H_s	: Tinggi Gelombang Signifikan	(m)

$$K_d = \frac{[\cosh(k(d-z_1))\sinh(k(d-z_1)) - \cosh(k(d-z_2))\sinh(k(d-z_2)) - kz_1 + kz_2]}{2k[\sinh(kd)]^2}$$

$$K_i = \frac{[\sinh(k(d-z_1)) - \sinh(k(d-z_2))]}{k \sinh(kd)}$$

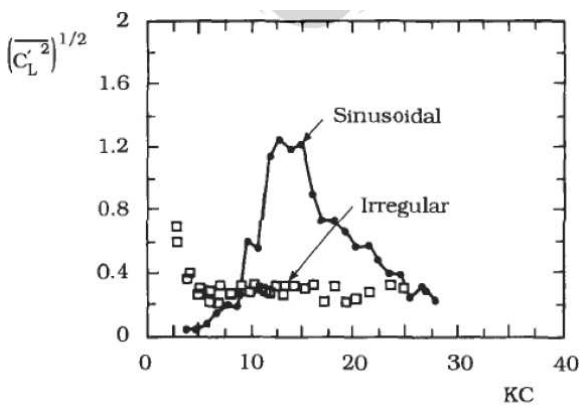
$$K_L = \frac{[\cosh(k(d-z_1))\sinh(k(d-z_1)) - \cosh(k(d-z_2))\sinh(k(d-z_2)) - kz_1 + kz_2]}{2k[\sinh(kd)]^2}$$

Untuk menentukan koefisien hidodinamik digunakan tabel 1 untuk menentukan koefisien hambatan dan koefisien inersia berdasarkan angka Reynold (Re) dan angka Keulegan-Carpenter (KC), serta gambar 3 digunakan untuk menentukan koefisien angkat berdasarkan angka Keulegan-Carpenter (KC):

Tabel 1 Koefisien Massa & Hambat untuk Benda Silinder (Clauss,1992)

	$Rn < 10^5$		$Rn > 10^5$	
	C_D	C_M	C_D	C_M
KC				
< 10	1.2	2.0	0.6	2.0
≥ 10	1.2	1.5	0.6	1.5

Sumber: Journee (2001, p.12-17)



Gambar 3 Koefisien Angkat pada Gelombang Acak dan Sinusoidal

Kekakuan Sturktur

Pada struktur floater kekakuan didapat dari mekanisme hidrostatis dan inersia yang didapat dari mekanisme ballast dan mekanisme *waterplane area*, serta mekanisme tethers.

$$K_{heave,H\&I} = \rho g \pi R_f^2$$

$$K_{roll,H\&I} = F_B z_B - M_G g z_G + \frac{\rho g \pi R_f^2}{4}$$

$$K_{pitch,H\&I} = F_B z_B - M_G g z_G + \frac{\rho g \pi R_f^2}{4}$$

$$K_{surge,T} = \frac{F_{total}}{L_T}$$

$$K_{sway,T} = \frac{F_{total}}{L_T}$$

$$K_{heave,T} = \frac{E_T A_T}{L_T}$$

$$K_{roll,T} = 2 \frac{E_T A_T}{L_T} (R + L_{leg})^2 + (F_B - M_G g) T$$

$$K_{pitch,T} = 2 \frac{E_T A_T}{L_T} (R + L_{leg})^2 + (F_B - M_G g) T$$

$$K_{yaw,T} = \frac{(R + L_{leg})^2}{L_T} (F_B - M_G g)$$

Dimana:

$K_{H\&I}$: Kekakuan Hidrostatik Inerisa	(kg/m)
K_T	: Kekakuan Tethers	(kg/m)
F_{total}	: Gaya Pretension Total	(kg)
L_T	: Panjang Tethers	(m)
E_T	: Modulus Elastisitas Tethers	(kg/m ²)
A_T	: Luas Penampang Tethers	(m ²)
R	: Jari-jari Platform	(m)
L_{leg}	: Panjang Kaki Platform	(m)
T	: Draft	(m)
F_B	: Gaya Apung	(kg)
M_G	: Massa Benda	(kg)
z	: Lengan Momen	(m)

Response Amplitude Operator (RAO)

Response amplitude operator adalah amplitudo dari respon struktur per satuan unit amplitudo gelombang. Untuk mendapatkan response amplitude operator adalah terlebih dahulu menentukan parameter sistem struktur seperti massa, kekakuan dan redaman. Setelah itu, fungsi pembebanan, RAO dan spektra respon struktur didapatkan dengan menggunakan spektrum gelombang. Fungsi transfer gelombang adalah fungsi pembebanan dibagi dengan tinggi signifikan gelombang. Spektral Respons Struktur adalah fungsi transfer beban dikalikan dengan spektrum gelombang.

Spektrum Gelombang

Merupakan pengembangan dari model spektrum Bretschneider (1959) dimana model spektrumnya menggunakan tinggi signifikan gelombang sebagai variable untuk fungsi spektrum gelombang. Persamaan model spektrum gelombang Ochi dan Hubble adalah sebagai berikut:

$$S(\omega) = \frac{1,25}{4} \frac{\omega_m^4}{\omega^5} H_s^2 e^{-1,25(\omega_m/\omega^4)}$$

Dimana:

ω : Frekuensi angular gelombang (rad/s)

ω_m : Frekuensi angular maksimum pada spektrum

H_s :Tinggi gelombang signifikan (m)

Perpindahan Struktur

Perpindahan struktur untuk derajat kebebasan yaw tidak dianalisis karena diasumsikan sudah dilakukan antisipasi dengan menambahkan komponen suppression.

Perpindahan surge:

$$\eta_1 = 3\sigma_{surge} + \frac{F_{Tsu}}{K_{Surge \ T+H\&I}}$$

Dimana:

η_1 : Perpindahan Surge (m)

$$\sigma_v^2 = 2 \int_0^\infty \left[\frac{1}{16} \frac{\rho_w C_D D_f \omega^2 H_s K_d + 2\rho_w C_M \pi D_f^2 \omega^2 K_i}{k - m\omega^2 + c\omega} \right]^2 x \left[\frac{1,25}{4} \frac{\omega_m^4}{\omega^5} H_s^2 e^{-1,25(\omega_m/\omega^4)} \right] d\omega$$

Perpindahan sway:

$$\eta_2 = v_g = 3\sigma$$

Dimana:

η_2 : Perpindahan Sway (m)

$$\sigma_v^2 = 2 \int_0^\infty \left[\frac{1}{16} \frac{\rho_w C_L D_f \omega^2 H_s K_l}{k - m\omega^2 + c\omega} \right]^2 \cdot \frac{1,25}{4} \frac{\omega_m^4}{\omega^5} H_s^2 e^{-1,25(\omega_m/\omega^4)} d\omega$$

Perpindahan heave:

$$\eta_3 = L_T \cdot \left(1 - \frac{\eta_1}{L_T} \right)$$

Dimana:

η_3 : Perpindahan Heave (m)

η_1 : Perpindahan Surge (m)

L_T : Panjang Tendon (m)

Perpindahan pitch:

$$\eta_5 = \frac{F_{thrust} l_t + F_w l_h + F_g l_g}{K_{pitch, T+H\&I}}$$

Dimana:

η_5 : Perpindahan Pitch (°)

l_t : Jarak antara gaya F_{thrust} ke keel (m)

l_h : Lengan momen gaya angin (m)

l_g : lengan momen gaya gelombang (m)

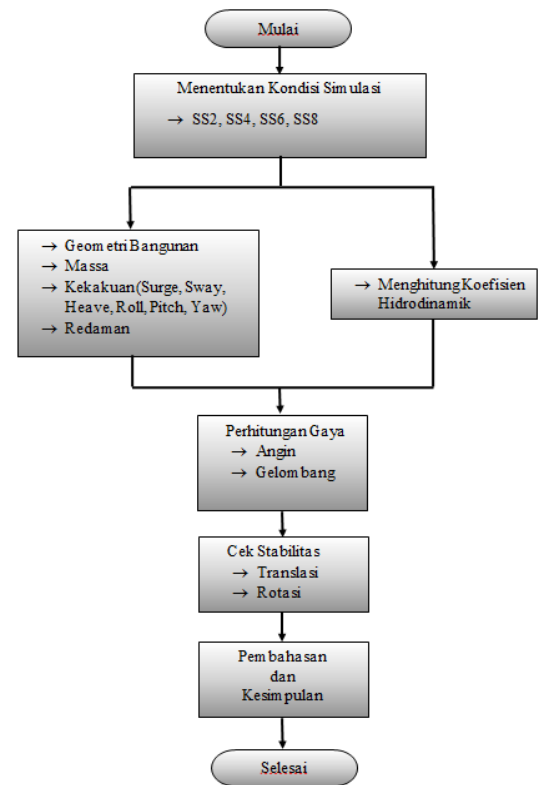
F_{thrust} : Gaya Thrust (kg)

F_w : Gaya akibat angin (kg)

F_g : Gaya akibat gelombang (kg)

METODE ANALISIS

Diagram Alir



Gambar 4 Diagram Alir Penelitian

Spesifikasi Turbin Angin

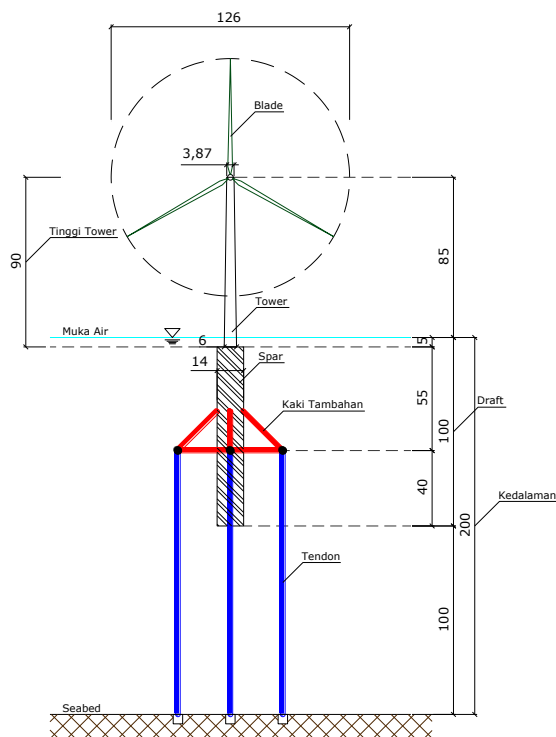
Turbin angin yang dipakai pada penelitian ini memiliki kapasitas produksi sebesar 5-MW dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tinggi Hub	: 90 m
Diameter Rotor	: 126 m
Luas Permukaan Blade	: 183 m ³
Diameter Hub	: 3 m
Massa Rotor	: 110.000 kg
Massa Blade Total	: 53.220 kg

Massa Hub	: 56.780 kg
Massa Nacelle	: 240.000 kg
Massa Tower	: 249.700 kg
Diameter Dasar Tower	: 6 m
Diameter Puncak Tower	: 3.87 m
Tebal Dasar Tower	: 0.027 m
Tebal Puncak Tower	: 0.019 m
Modulus Young	: 210 GPa
Modulus Geser	: 80,8 GPa
Rapat Massa	: 8.500 kg/m ³
Elevasi Dasar Tower	: -5 m
Elevasi Puncak Tower	: 85 m

Dimensi yang digunakan untuk mendukung turbin angin 5-MW adalah sebagai berikut:

Kedalaman (h)	: -200 m
Draft (T)	: -100 m
Diameter Dasar Tower	: 6 m
Draft Dasar Tower	: -5 m
Diameter Spar	: 14 m
Tebal Plat Baja Spar	: 0.15 m
Material	: Baja
Rapat Massa	: 7.850 kg/m ³
Volume yang dipindahkan	: 16.813 m ³
Massa Total (termasuk Ballast)	: 169.063.800 N
Jumlah Tendon	: 4 buah
Elevasi Kaki Tambahan	: -60 m
Panjang Kaki Tambahan	: 25 m
Diameter Tendon	: 0,45 m



Gambar 5 Sket Disain Floater

Tabel 2 Data Simulasi

Sea State	Gelombang		Angin
	Hs (meter)	Tp (detik)	$U_{h=19.5m}$ (m/s)
SS2	0,30	7,5	4,37
SS4	1,88	8,8	9,77
SS6	5,00	12,4	19,29
SS8	11,50	16	30,61

Tahapan perencanaan yang dilakukan diantaranya adalah:

1. Menghitung massa total struktur dan kekakuan struktur, massa struktur dan kekakuan sistem struktur.
2. Menentukan frekuensi alami struktur pada masing-masing derajat kebebasan.
3. Menghitung gaya angin dan gaya hidrodinamik, gaya akibat angin
4. Menghitung spektral respon struktur.
5. Menghitung perpindahan translasi dan rotasi yang terjadi
6. Validasi dengan kondisi perpindahan yang diijinkan.
7. Selesai.

PEMBAHASAN

Sebagai pembanding digunakan turbin angin terapung lepas pantai yang dibuat oleh NREL menggunakan sistem tension leg platform berkaki empat. Model TLP-NREL adalah sistem dengan gaya pembalik dari mooring yang lebih dominan. Perbedaan model TLP-NREL dengan *Tension Leg Spar Floater* adalah pada ukuran silinder platform. *Tension Leg Spar Floater* memiliki silinder yang lebih langsing dibandingkan dengan TLP-NREL. Letak leg TLP-NREL berada didasar silinder sedangkan leg pada *Tension Leg Spar Floater* berada ditengah silinder.

Kontribusi Gaya yang Bekerja

Pada **gambar 6** menunjukkan bahwa beban angin yang bekerja akan semakin besar seiring dengan berubahnya *sea state* mengingat semakin besar *sea state* maka kecepatan angin juga semakin besar. Kontribusi beban angin pada tiang terhadap total beban angin adalah sebesar 24.81 % dan beban

thrust terhadap total beban angin adalah 75.19 %. Pada **gambar 7** menunjukkan bahwa beban gelombang *surge* pada *sea state* 2 mendekati garis sumbu x karena beban yang diterima sangat kecil dibandingkan *sea state* lain. Dan pada *sea state* 8 menunjukkan beban yang sangat besar, mencapai dua kali lipat dari *sea state* 6. Pada **gambar 8** menunjukkan beban gelombang *sway* memiliki bentuk yang menyerupai grafik transfer fungsi beban, namun *sea state* 2 dan *sea state* 4 saling berhimpitan karena nilainya yang sangat kecil.

Kekakuan Struktur

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan Hendi (2011) menunjukkan bahwa TLP-NREL lebih baik apabila dibandingkan dengan TLP-MIT. Pada **Tabel 3** menunjukkan bahwa *Tension Leg Spar Floater* memiliki kekakuan lebih besar pada derajat kebebasan *Surge*, *Sway*, *Pitch* dan *Roll*. Sedangkan TL-NREL lebih unggul pada kekakuan derajat kebebasan *Heave*.

Frekuensi Alami Struktur

Pada **Gambar 9** dapat dilihat bahwa frekuensi alami struktur *Tension Leg Spar Floater* pada derajat kebebasan *surge*, *sway*, dan *heave* lebih besar 4 (empat) kali lipat apabila dibandingkan dengan TLP-NREL. Sedangkan untuk derajat kebebasan *pitch* dan *roll* lebih kecil.

Spektrum Gelombang

Gambar 10 menunjukkan bahwa semakin besar parameter tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang signifikan dan kecepatan angin maka distribusi energi gelombang laut akan semakin besar. Pada *Sea State* 8 dengan kondisi tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang signifikan dan kecepatan angin terbesar dibandingkan dengan ketiga variasi didapatkan grafik *Sea State* 8 dengan angka yang paling besar

dibandingkan dengan spektrum gelombang pada *sea state* lainnya.

Fungsi Transfer Beban

Pada **Gambar 11** dapat dilihat bahwa fungsi transfer beban pada derajat kebebasan *surge* untuk berbagai variasi *sea state* terlihat saling berhimpitan. Hal ini terjadi dikarenakan fungsi beban gelombang inersia lebih dominan apabila dibandingkan dengan fungsi beban gelombang hambat. Pada **gambar 12** dapat dilihat bahwa fungsi transfer beban pada derajat kebebasan *sway* akan semakin besar apabila parameter tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang signifikan serta kecepatan angin juga semakin besar.

Response Amplitude Operator (RAO)

Puncak RAO pada derajat kebebasan *surge* pada **gambar 13** dan *sway* pada **gambar 14** terjadi pada frekuensi angular (ω) = 1,28 rad/s. Nilai yang sama juga didapatkan pada frekuensi alami angular struktur pada derajat kebebasan yang sama pada *tension leg spar floater* yaitu sebesar (ω_n) = 1,28 rad/s. Hal ini menyebabkan resonansi struktur dan gelombang sehingga terjadi RAO yang sangat besar. Namun berbeda dengan RAO *surge*, pada RAO *sway* didapatkan bahwa semakin besar parameter tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang signifikan serta kecepatan angin maka RAO juga akan semakin besar. Sedangkan pada RAO *surge* setiap *sea state* adalah saling berhimpitan.

Spektra Respon Struktur

Bentuk spektra respon struktur memiliki kecenderungan bentuk yang sama dengan bentuk spektrum gelombang yang digunakan yaitu puncaknya juga berada pada (ω) = 1,28 rad/s. Pada **gambar 15** menunjukkan bahwa spektra respon struktur *surge* semakin membesar seiring dengan

semakin tinggi besaran parameter pada masing-masing *sea state*. Namun untuk *sea state* 2 spektra respon strukturnya sangat kecil ditunjukkan dengan grafik yang berhimpitan dengan sumbu x dimana $S_u(\omega) < 100$ meter. Sedangkan pada **gambar 16** menunjukkan bahwa spektra respon struktur untuk *sea state* 8 memiliki sangat besar dan *sea state* 2, 4, 6 sangat jauh dibawahnya. Dapat dilihat bahwa untuk *sea state* 8 memiliki $S_u(\omega) > 1.4 \times 10^3$ dan yang lainnya memiliki $S_u(\omega) < 0.2 \times 10^3$.

Perpindahan Translasi dan Rotasi Struktur

Perpindahan yang terjadi dipengaruhi oleh gaya gelombang dan gaya angin. Gaya arus tidak dianggap berkontribusi dikarenakan tension leg spar floater berada di laut dalam sehingga diasumsikan tidak ada gaya arus yang terjadi. Semakin tinggi parameter *sea state* maka akan semakin besar pula perpindahan translasi dan rotasi yang terjadi. Peningkatan perpindahan terjadi pada semua derajat kebebasan. Pada **gambar 17** menunjukkan bahwa perpindahan pada derajat kebebasan *surge* relatif linier dengan perpindahan pada kondisi ekstrim sebesar 50.9550 meter. Pada **gambar 18** menunjukkan bahwa perpindahan pada derajat kebebasan *sway* mengalami kenaikan yang cukup signifikan dengan perpindahan pada kondisi ekstrim sebesar 0,0249 meter. Namun apabila dibandingkan

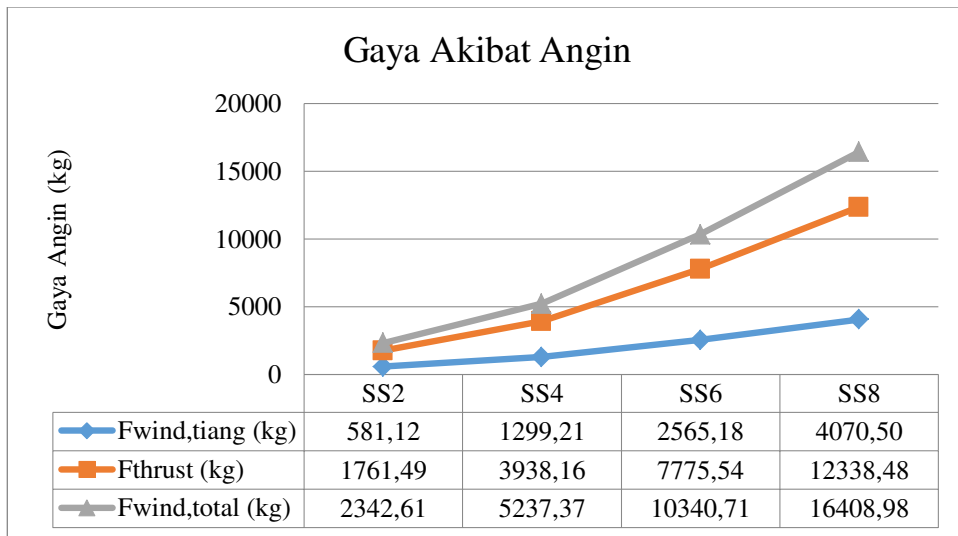
dengan dimensi *floater* maka perpindahan yang terjadi sangat kecil. Pada **gambar 19** menunjukkan bahwa perpindahan pada derajat kebebasan *heave* mengalami kenaikan yang relatif linier dengan perpindahan pada kondisi ekstrim sebesar 9.0816 meter. Pada **gambar 20** menunjukkan bahwa perpindahan pada derajat kebebasan *pitch* mengalami kenaikan yang relatif linier dengan perpindahan pada kondisi ekstrim sebesar 0.0135° . Pada **gambar 21** menunjukkan bahwa perpindahan pada derajat kebebasan *roll* mengalami kenaikan yang relatif linier dengan rotasi pada kondisi ekstrim sebesar 0.0000066° . Respon struktur pada derajat kebebasan *pitch* perlu diperhatikan mengingat adanya kategori stabilitas untuk turbin angin seperti pada subbab 2.5. Didapatkan kondisi *pitchsea state* 2 sebesar $0.0005^\circ < 0.7^\circ$ maka statusnya adalah *operating*. Kondisi *pitchsea state* 4 sebesar $0.0025^\circ < 0.7^\circ$ maka statusnya adalah *operating*. Kondisi *pitchsea state* 6 sebesar $0.0066^\circ < 0.7^\circ$ maka statusnya adalah *operating*. Kondisi *pitchsea state* 8 sebesar $0.0135^\circ < 0.7^\circ$ maka statusnya adalah *operating*.

Gaya pada Tethers

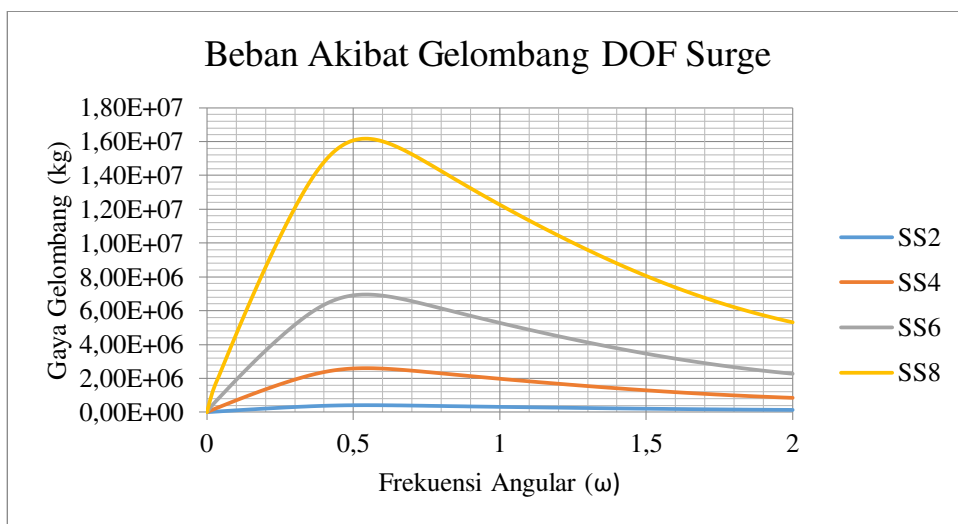
Pada **gambar 22** menunjukkan bahwa semakin besar gaya eksitasi berbanding lurus dengan meningkatnya gaya tarik tether pada *upwind* dan semakin menurun pada *downwind*.

Tabel 3 Kekakuan Struktur Pada Tiap Derajat Kebebasan

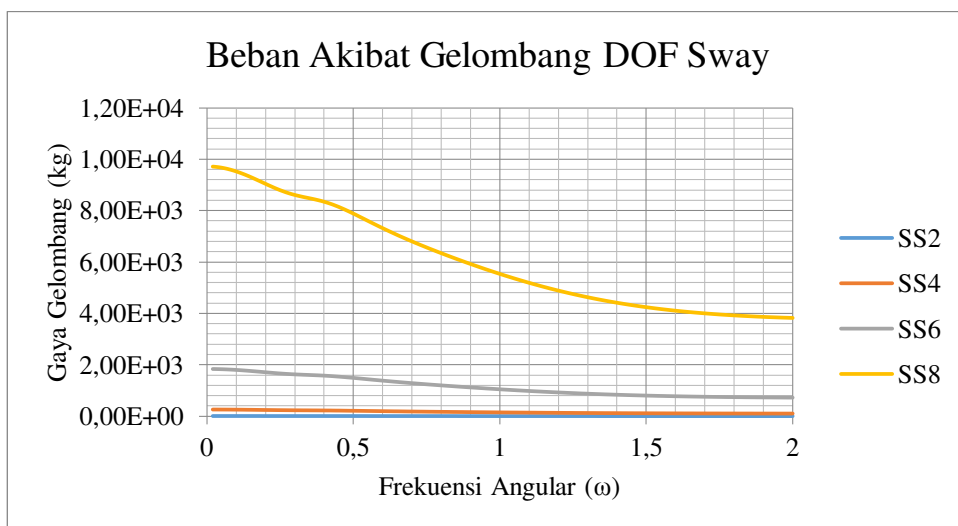
	Surge	Sway	Heave	Pitch	Roll
	N/m	N/m	N/m	N.m/rad	N.m/rad
NREL	3,68,E+05	3,68,E+05	1,83,E+08	2,12,E+10	2,12,E+10
SPAR	1,16,E+06	1,16,E+06	1,11,E+08	7,92,E+10	7,92,E+10
Rasio SPAR/NREL	3,15	3,15	0,61	3,74	3,74



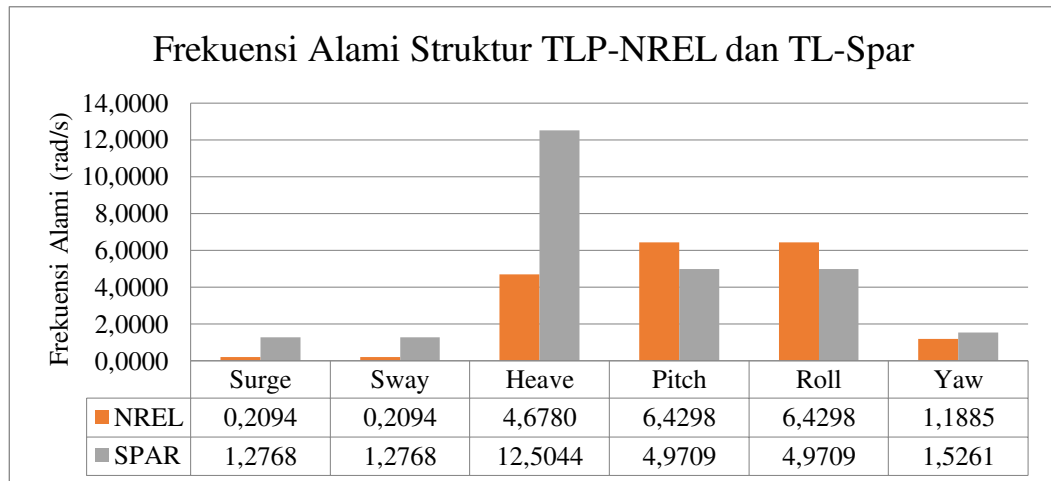
Gambar 6 Gaya Akibat Angin Pada Tiang dan Rotor



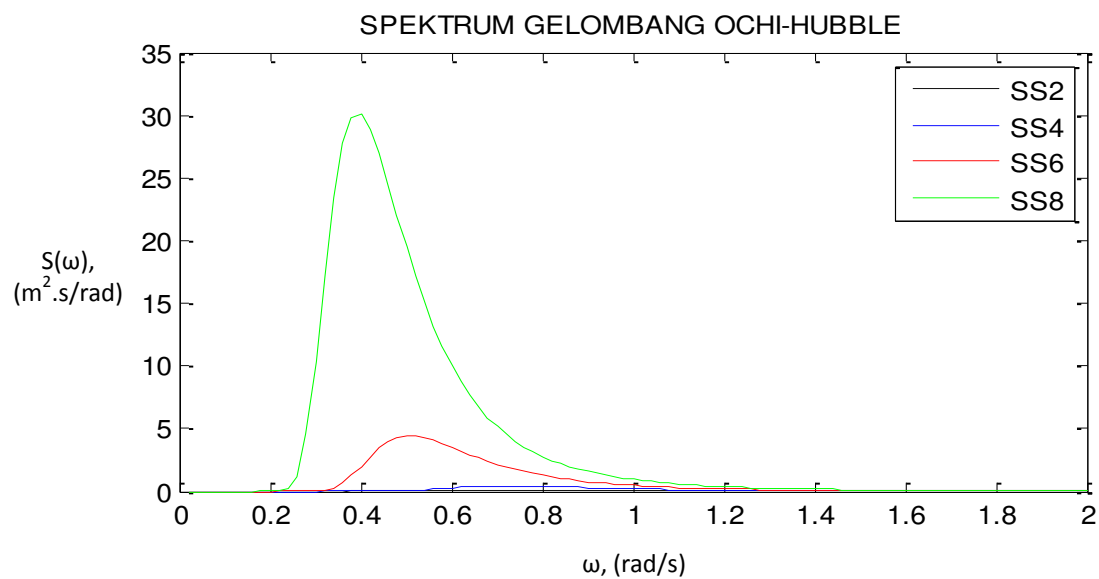
Gambar 7 Gaya Akibat Gelombang pada Tension Leg Spar Floater (SPAR)



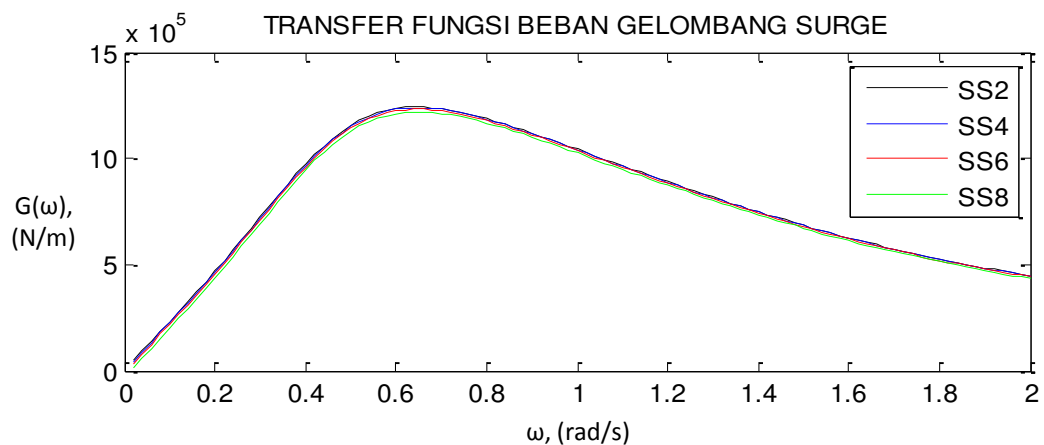
Gambar 8 Gaya Akibat Gelombang pada Tension Leg Spar Floater (SPAR)



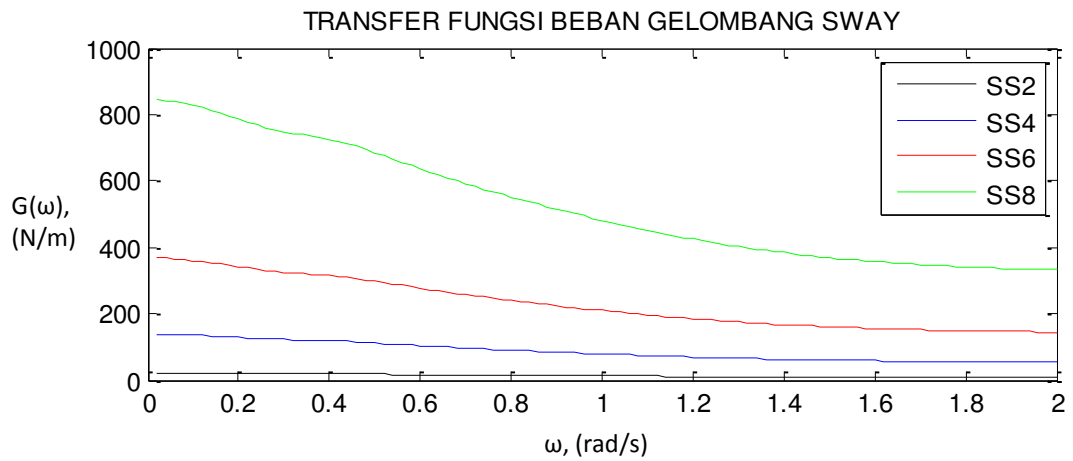
Gambar 9 Frekuensi Alami Struktur TLP-NREL dan Tension Leg Spar Floater (SPAR)



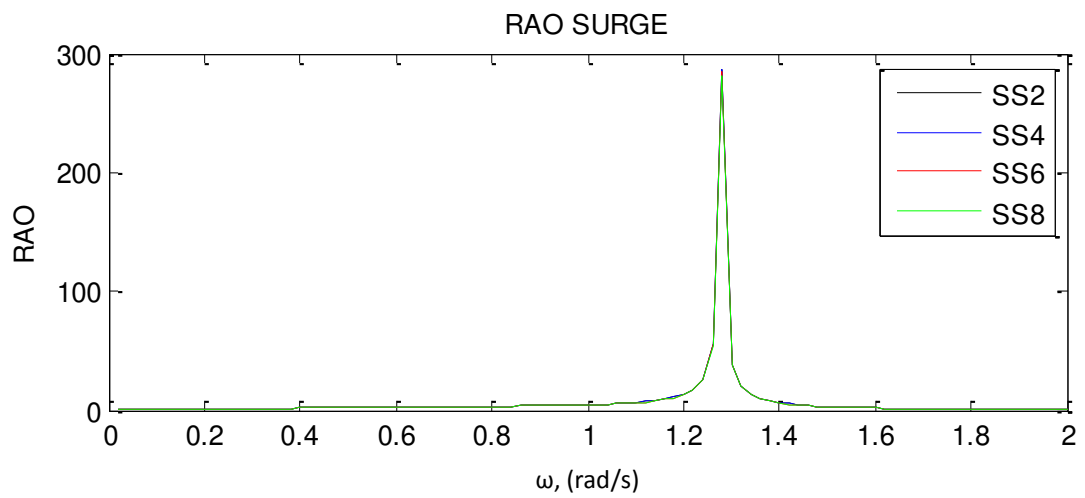
Gambar 10 Spektrum Gelombang Ochi-Hubble



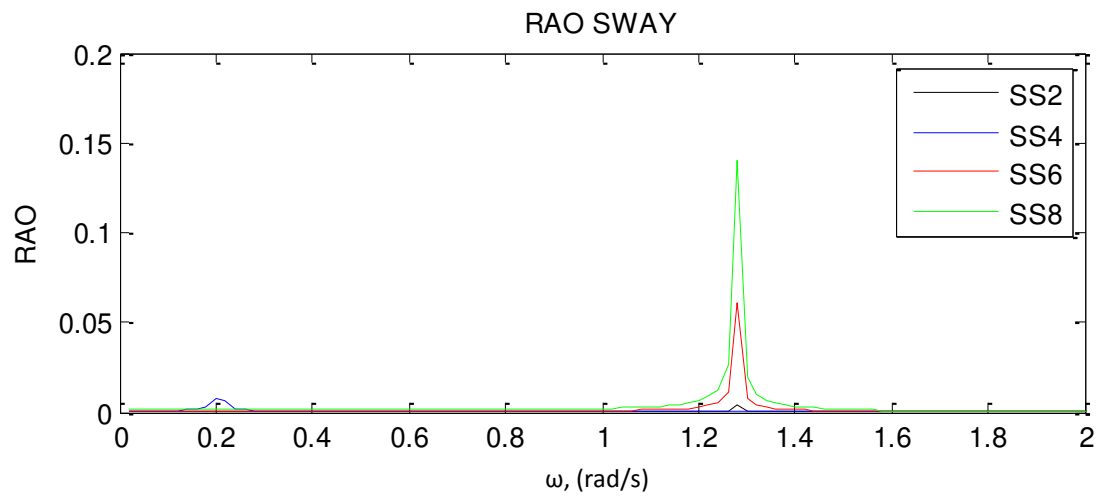
Gambar 11 Transfer Fungsi Beban Gelombang Surge Tension Leg Spar Floater



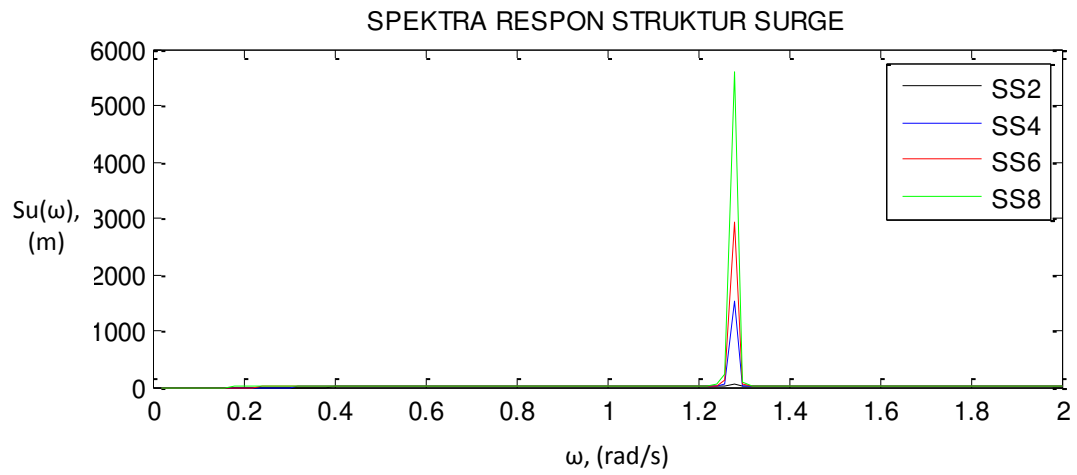
Gambar 12 Transfer Fungsi Beban Gelombang Sway Tension Leg Spar Floater



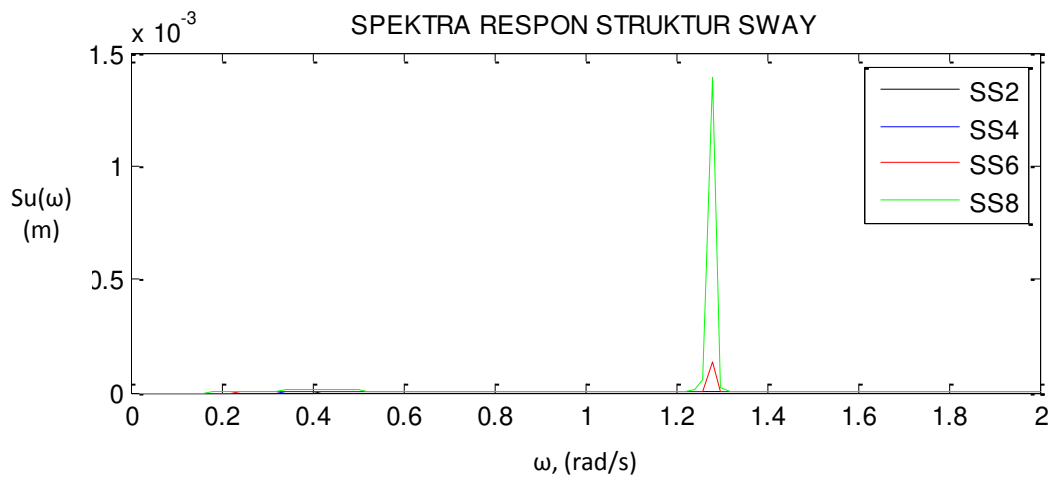
Gambar 13 Response Amplitude Operator Surge Tension Leg Spar Floater



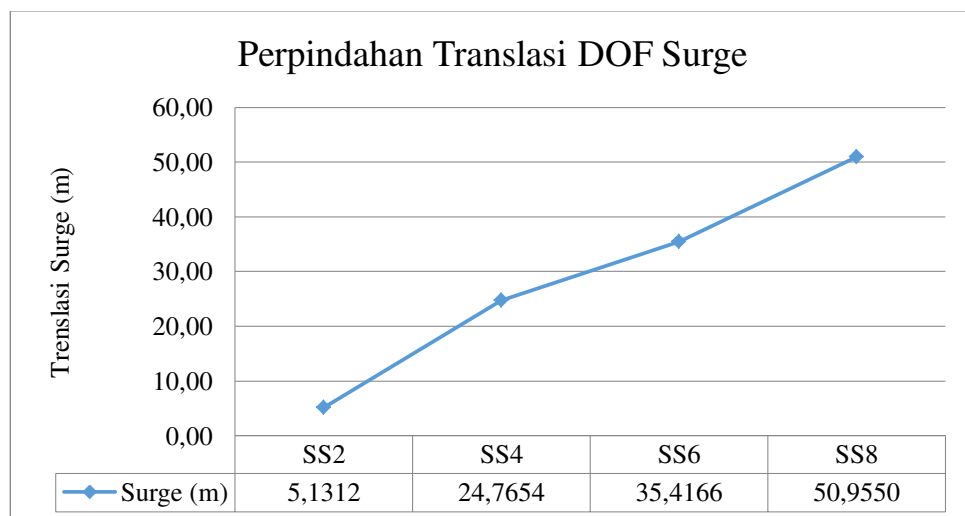
Gambar 14 Response Amplitude Operator Sway Tension Leg Spar Floater



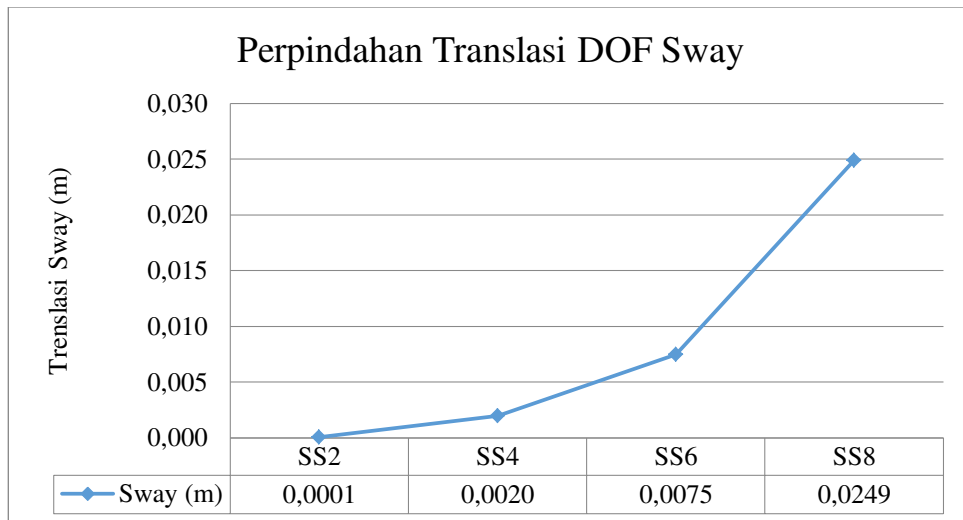
Gambar 15 Spektra Respon Struktur Surge Tension Leg Spar Floater



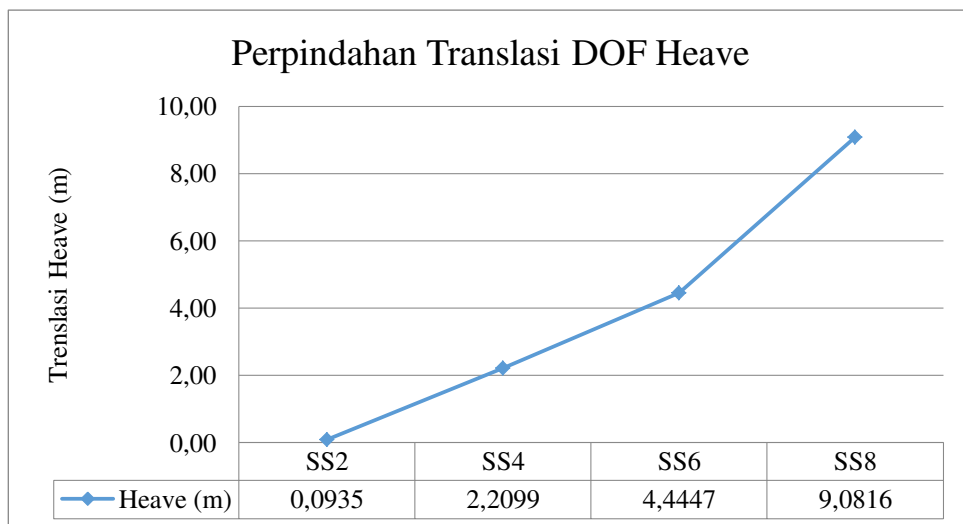
Gambar 16 Spektra Respon Struktur Sway Tension Leg Spar Floater



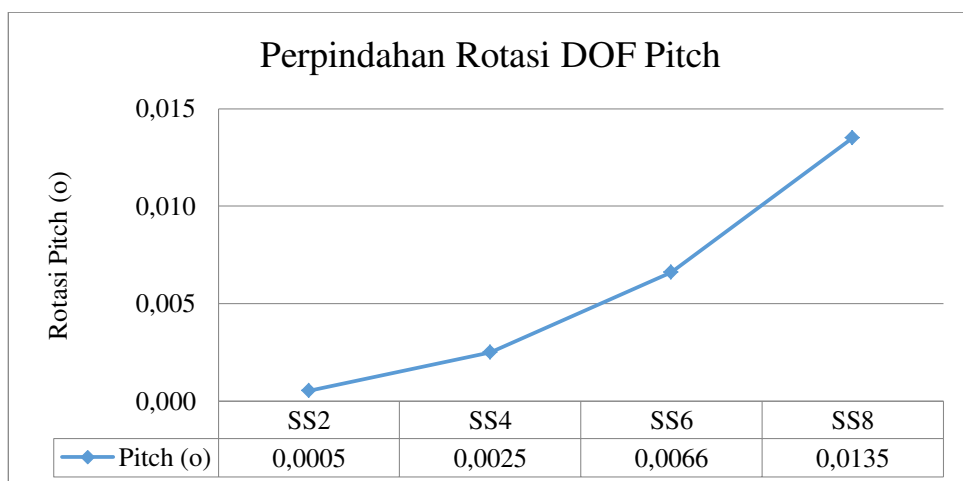
Gambar 17 Stabilitas Turbin Angin Terapung Lepas Pantai DOF Surge



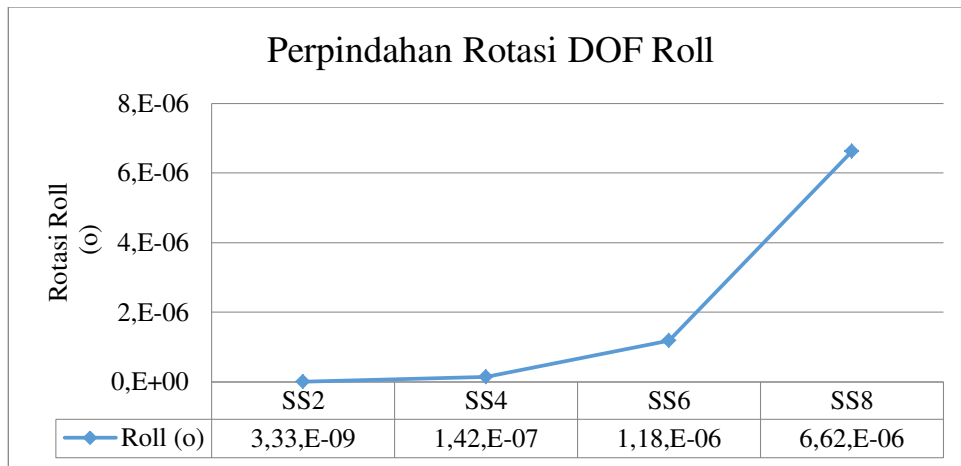
Gambar 18 Stabilitas Turbin Angin Terapung Lepas Pantai DOF Sway



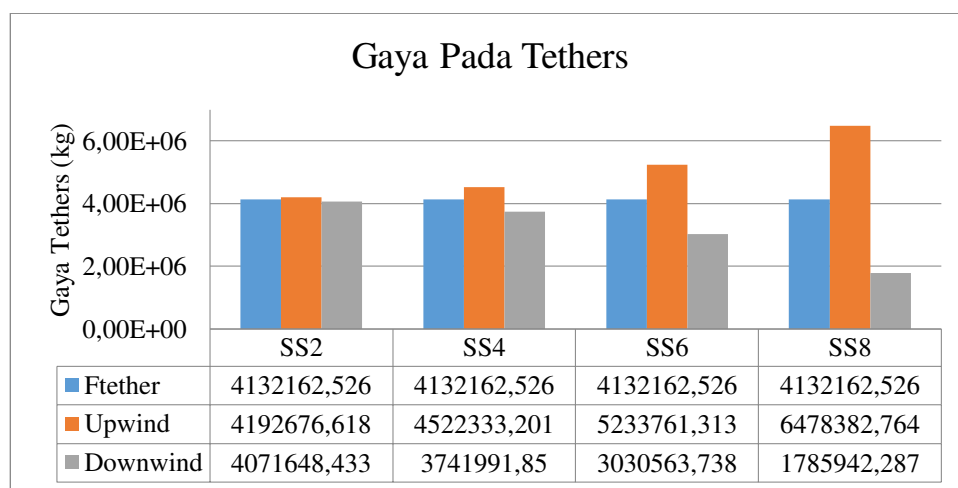
Gambar 19 Stabilitas Turbin Angin Terapung Lepas Pantai DOF Heave



Gambar 20 Stabilitas Turbin Angin Terapung Lepas Pantai DOF Pitch



Gambar 21 Stabilitas Turbin Angin Terapung Lepas Pantai DOF Roll



Gambar 22 Gaya pada Tethers Turbin Angin Terapung Lepas Pantai

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi kondisi laut maka kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Kontribusi gaya gelombang lebih dominan apabila dibandingkan dengan kontribusi gaya angin. Kontribusi beban terhadap sistem struktur adalah sebesar 99.34% untuk beban gelombang, 0.16% untuk beban angin pada tower dan 0.49% untuk beban angin pada rotor. Pada *sea state*

4 sebagai kondisi yang paling sering terjadi di lapangan, gaya gelombang dengan tinggi gelombang 1,88 meter pada arah *surge* adalah sebesar 2.424.700 kg dan pada arah *sway* 179,22 kg. Sedangkan untuk *sea state* 8 sebagai kondisi ekstrim di lapangan, gaya gelombang dengan tinggi gelombang sebesar 11,5 meter pada arah *surge* adalah sebesar 14.789.000 kg dan pada arah *sway* 8344,6 kg.

2. Pada *sea state* 4 sebagai kondisi yang paling sering terjadi di lapangan

didapatkan perpindahan *surge* sebesar 24,77 meter, *sway* sebesar 0,002 meter, *heave* sebesar 2,21 meter serta perpindahan rotasi *pitch* sebesar $0,003^{\circ}$ dan *roll* sebesar $1,42 \times 10^{-7}^{\circ}$. Pada *sea state* 8 sebagai kondisi ekstrim di lapangan didapatkan perpindahan *surge* sebesar 50,96 meter, *sway* sebesar 0,025 meter, *heave* sebesar 9,08 meter serta perpindahan rotasi *pitch* sebesar $0,014^{\circ}$ dan *roll* sebesar $6,62 \times 10^{-6}^{\circ}$. Batas ijin operasi mesin turbin angin dipengaruhi dengan besarnya *pitch* yang terjadi. Dari hasil simulasi didapatkan kondisi semua *sea state* berada pada status *operating*.

Saran

1. Desain *Tension Leg Spar Floater* untuk turbin angin kapasitas 5 MW bisa direncanakan dengan panjang atau dimensi spar yang lebih kecil untuk mendapatkan desain yang lebih efisien.
2. Untuk penelitian selanjutnya dapat ditambahkan *ballast* sebagai pemberat pada dasar spar dan variasi ukuran turbin angin dengan kapasitas yang lebih besar. Menyelidiki pengaruh beban dan vortex yang terjadi terhadap derajat kebebasan *Yaw*. Serta mempertimbangkan untuk analisis

pembebanan gelombang dan angin 3 dimensi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardian. 2006. *Analisa Mooring Pada FPSO Sistem Turret dengan Pendekatan Frekuensi Domain*. Depok: Universitas Indonesia.
- Army Corps Engineer. 2003. *Shore Protection Manual*. Washington : US Departement of Army.
- BPPT. 2014, *Outlook Energi Indonesia 2014 – Pengembangan Energi dalam Mendukung Subsitusi BBM*. Jakarta: PTPSE-BPPT.
- Bundessamt fur Seeschiffahrt Und Hydrographie. 2007. *Standard Design of Offshore Wind Turbine*. Hamburg & Rostock.
- Det Norske Veritas. 2013, *Design of Floating Wind Turbine Structures*. Norwegia: DNV.
- Det Norske Veritas. 2010, *Environmental Condition and Environmental Loads*. Norwegia: DNV.
- Det Norske Veritas. 2010, *Global Performance Analysis of Deepwater Floating Structures*. Norwegia: DNV.
- Hendi. 2011, *Analisa Stabilitas Turbin Angin Terapung Lepas Pantai Tipe Sistem Tension Leg Platform*. Depok: Universitas Indonesia.
- Houcque, D. 2005, *Introduction To Matlab For Engineering Students*. Illinois: Northwest University.
- Journee, J.M.J. & Massie, W.W. 2001, *Offshore Hydromechanics, First Edition*. Delft: Technische Universiteit Delft.

- Koekkoek, R. 2015, *Gravity Base Foundation for Offshore Wind Turbine*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Lee, W.T., Bales, S.L., Sowby, S.E. 1985, *Standardized Wind and Wave Environments for North Pacific Ocean Areas*. Bethesda, Maryland: David W. Taylor Naval Ship Research & Development Center.
- Mercier, R. 2004, *Technology Issue With Deepwater Wind Energy Systems*. USA: Offshore Technology Research Center.
- Triatmodjo, B. 1999, *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Rachman, A. 2012, *Analisis dan Pemetaan Potensi Energi Angin di Indonesia*. Depok: Universitas Indonesia.
- Sachithanathamoorthy, K. 2012, *Design and Analysis of Tension Leg Anchor Systems for Floating Windmills*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Sarpkaya & Isaacson. 1982, *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Suroso. 2008, *Hidrolika Dasar*. Malang: BARGIE Media.
- Wayman, E.N., Sclavounos, P.D., Butterfield, S., Jonkman, J., Musial, W. 2006, *Coupled Dynamic Modelling of Floating Wind Turbine Systems*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Westgate, Z.J. & DeJong, J.T. 2005. *Geotechnical Considerations for Offshore Wind Turbine*. ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/252536016_Geotechnical_Considerations_for_Offshore_Wind_Turbines(diakses 1 Desember 2016).